

Schweißversuche mittels Kondensator- Stoßentladung

Hofmann, Wilhelm
Schuhmacher, Günter

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 5, 1953,
S. 122-131



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Schweißversuche mittels Kondensator-Stoßentladung

Von **Wilhelm Hofmann** und **Günter Schuhmacher**

Mit 7 Abbildungen

Summary: The surfaces to be welded were connected with a condenser. The voltage was 500 to 3000 V at a capacity of 40 to 500 μ F. When the two parts were pushed together they were welded by means of the high density of energy in space and time. The following metals could be welded: wolfram with constantan, wolfram with German silver, wolfram with copper, wolfram with lead, wolfram with aluminium, wolfram with bismuth, aluminium with copper, hardmetal with steel, lead with steel. The quality of the welded joint was controlled by tensile tests, by metallographic examination and by resistance measurements.

Grundsätzliches zum Schweißverfahren

Die Durchführung der Schweißversuche erfolgte nach der von Vang*) angegebenen Methode. Man spannt die zu verschweißenden Teile in eine Vorrichtung und legt an sie die Spannung eines auf 2000 bis 5000 V geladenen Kondensators. Sodann werden die Teile gegeneinandergeschlagen. In einem Abstand (0,5 bis 1,5 mm, abhängig von der Spannung) tritt eine Entladung ein. Unmittelbar hiernach erfolgt die Berührung und Verschweißung der Teile. Die Dauer des Schweißvorganges beträgt nur $\frac{1}{1000}$ sec und weniger. Daher ist die Ableitung der im Lichtbogen und auf den Oberflächen entstehenden Wärmemengen in die zu verschweißenden Teile hinein sehr gering. Die große räumliche und zeitliche Energiedichte führt, soweit sie für den Schweißvorgang nutzbar gemacht wird, vornehmlich zur Erschmelzung der Oberfläche und zur Verdampfung von Metall. Die Metaldämpfe haben dabei die Wirkung eines Schutzgases. Die Eigenart des Verfahrens ermöglicht es, Metalle mit sehr verschiedenen Schmelzpunkten und großen Härteunterschieden, sowie Metalle gleicher Art, die schwer oder mit den üblichen Methoden gar nicht schweißbar sind, zu vereinigen. Die Größe der zu verschweißenden Flächen soll allerdings auf etwa 1 cm² begrenzt sein.

Schweißanlage

Elektrische Anlage. Der Aufbau der elektrischen Einrichtung ist aus Abb. 1 zu erschen. An wesentlichen Teilen sind zu nennen: der Regeltrafo T_1 (primär 220, sekundär 0 bis 75 V), der Hochspannungstrafo T_2 (primär 110, sekundär 7000 V), die Gleichrichterröhre G der Type VH 3, die Kondensatorbatterie K von 500 μ F, das statische Voltmeter $St. V.$ (Meßbereich 0 bis 6000 V) und die Schweißvorrichtung M . Ferner ist noch eine Spule zur Änderung der

*) Welding Handbook, American Welding Society, 3. Aufl., New York 1950, S. 354 u. S. 442.

Induktivität des Entladungskreises zu erwähnen. (Die Induktivität der Spule beträgt 0 bis $2,5 \cdot 10^{-4}$ H, die Induktivität des Entladungskreises ohne Spule $1,5 \cdot 10^{-5}$ H und sein Ohmscher Widerstand $R \approx 0,1 \Omega$.)

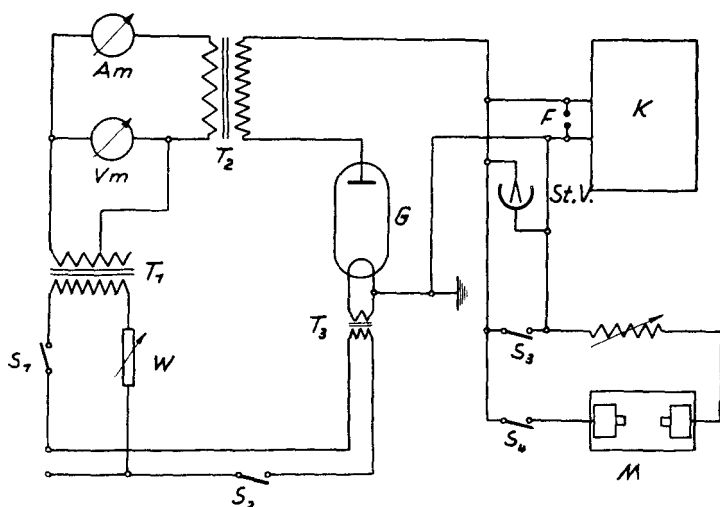


Abb. 1. Schaltbild der elektrischen Anlage

Schweißvorrichtung. Die erstellte Vorrichtung ist vielseitig verwendbar und ermöglicht die Verschweißung von Plättchen, Stiften, Blechen mit Stiften und von langen Drähten bis zu einem Durchmesser von 3 mm. Die Halterung der Teile erfolgt mittels Spannzange in einer bei Uhrmacherdrehbänken, etwa dem Lorch-Schmidt-Drehstuhl, üblichen Weise. Der Bewegungsvorgang und damit der Schweißvorgang wird durch den Hebel ganz rechts ausgelöst (Abb. 2).

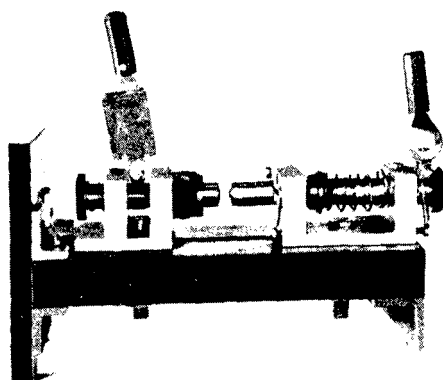


Abb. 2. Schweißvorrichtung

Der Antrieb wurde wahlweise durch Federn mit den Federkonstanten $c_1 = 57 \text{ pd/mm}$; $c_2 = 172 \text{ pd/mm}$; $c_3 = 850 \text{ pd/mm}$ bewirkt. Durch Änderung der Federspannung, sowie des Abstandes der zu verschweißenden Flächen konnten Geschwindigkeit, Druck und Impuls des beweglichen Teiles beim Aufprall in gewünschter Weise eingestellt werden. Seine Masse ($M = 96 \text{ g}$) ließ sich leicht durch Anschrauben von Zusatzmassen bis $1,5 \text{ kg}$ vergrößern. Eine Sperrklinke (Zahnung und Hebel rechts vorn) verhinderte ein Zurückfedern des beweglichen Teiles nach dem Aufprall und damit ein mögliches Reißen der Schweißnaht, bevor ihre volle Festigkeit erreicht war. Sockel und Grundplatte der Vorrichtung sind aus Pertinax, wodurch die Proben gegeneinander und gegen Erde gut isoliert wurden.

Weg-Zeit-Funktion für den Bewegungsvorgang

Zur quantitativen Erfassung der Schweißvorgänge wurde die Bewegungsgleichung und Weg-Zeit-Funktion ermittelt. Wie in Abb. 3 angedeutet,

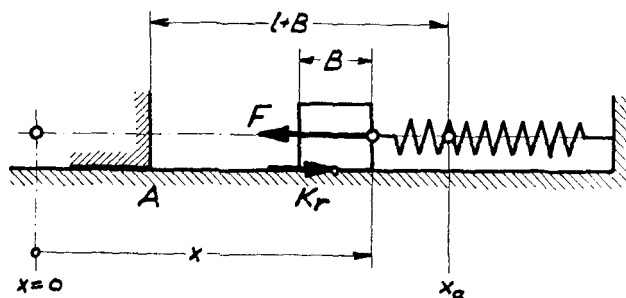


Abb. 3. Schematische Darstellung des Bewegungsvorganges. l : Abstand der anzuschweißenden Fläche in der Ausgangsstellung. OA wird für die jeweilige Schweißung eingestellt. x_a Ausgangszustand der Feder. Die entspannte Feder erreicht die Lage $x=0$, F = Federkraft, K_R : Reibungskraft

kann man den Bewegungsvorgang als einen unterbrochenen Schwingungsvorgang eines Körpers auffassen, der an einer Feder befestigt ist, und auf den eine Reibungskraft einwirkt.

Für die Bewegungsgleichung gilt:

$$m\ddot{x} = -cx + K_R,$$

wobei m = Masse; c = Federkonstante; K_R = Gleitreibung. Hieraus folgt unter Berücksichtigung der Grenzbedingungen bei $t = 0$:

$$x = x_a; \quad \dot{x} = 0;$$

$$x = \left(x_a - \frac{K_R}{c} \right) \cdot \cos \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot t + \frac{K_R}{c}$$

(K_R etwa 600 pd).

Strom-Zeitkurve und maximale Stromstärke für einen Schweißvorgang

Gleichfalls von Bedeutung für die Erfassung der Schweißvorgänge war die Strom-Zeitkurve. Abb. 5 zeigt eine derartige Kurve, die mittels eines Kathodenstrahloszillographen unter Verwendung einer in Abb. 4 erläuterten Schaltung aufgenommen wurde. Versuchsbedingungen: Kleinbildkamera, Röntgenfluorrapidfilm; Spannung $V = 1500$ V; Kapazität $107 \mu\text{F}$; Induktivität $L = 1,2 \cdot 10^{-5}$ H; $R = 0,1 \Omega$; Abstand der zu verschweißenden Teile $l = 10$ mm; Federkonstante $c_2 = 172$ pd/mm; Anfangsauslenkung der Feder $x_a = 24,5$ mm; Frequenz der horizontalen Ablenkung 456 H. Aus der Aufnahme sind der periodische Ablauf der Entladung und die Frequenz zu erkennen. Weiterhin läßt sich zeigen, daß während der Lichtbogenentladung ein Polwechsel zwischen den zu verschweißenden Teilen eintritt, was für die Vollständigkeit der Verschweißung wichtig ist. Ferner kann man auf die maximale Stromstärke schließen. Sie betrug in vorliegendem Falle etwa 3000 A.

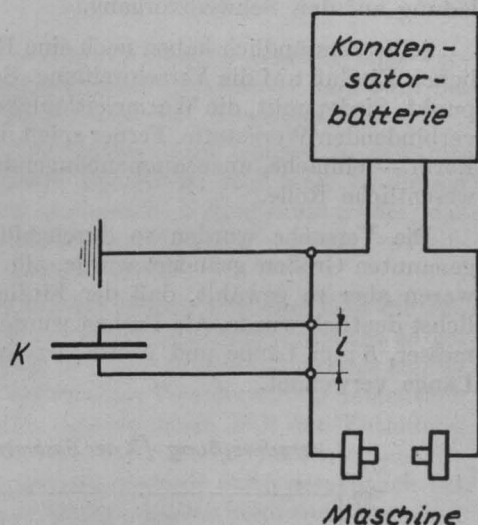


Abb. 4. Schaltbild zur Aufnahme der Strom-Zeit-Kurve. L : Meßstrecke, K : Vertikale Ablenkplatten des Oszillographen

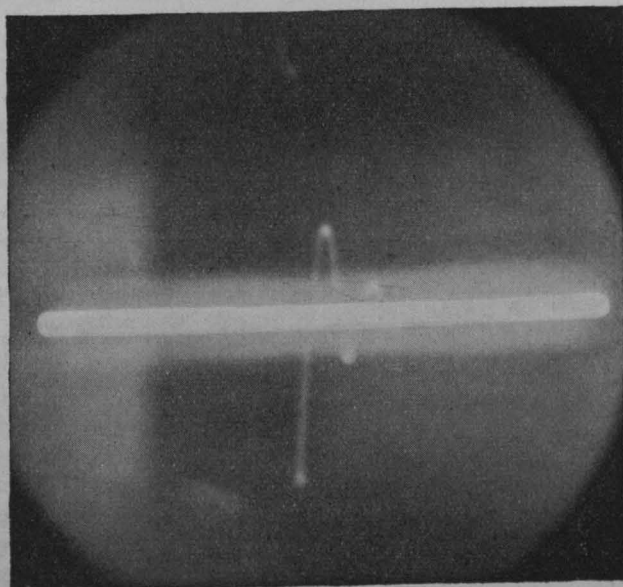


Abb. 5. Aufnahme einer Strom-Zeit-Kurve

Untersuchung der Abhängigkeit des Schweißvorganges von den Versuchsbedingungen der Schweißanlage

Untersucht wurden der Einfluß der Kapazität, Spannung, Induktivität, Geschwindigkeit, sowie des Impulses, Druckes und einer aperiodischen Entladung auf den Schweißvorgang.

Selbstverständlich haben noch eine Reihe anderer Größen oft einen erheblichen Einfluß auf die Verschweißung. Solche Größen sind z. B. der Schmelzpunkt, Siedepunkt, die Wärmeleitfähigkeit, Härte und Verformbarkeit der zu verbindenden Werkstoffe. Ferner spielt die Flächengröße und die geometrische Form — einfache, unzusammenhängende oder gewölbte Flächen usw. — eine wesentliche Rolle.

Die Versuche wurden so durchgeführt, daß jeweils nur eine der oben genannten Größen geändert wurde, alle übrigen aber konstant blieben. Diese waren aber so gewählt, daß der Einfluß der zu verändernden Größe möglichst deutlich wurde. Als Proben wurden Wolframzylinder von 2 mm Durchmesser, 5 mm Länge und Neusilberzylinder von 2 mm Durchmesser, 16 mm Länge verwendet.

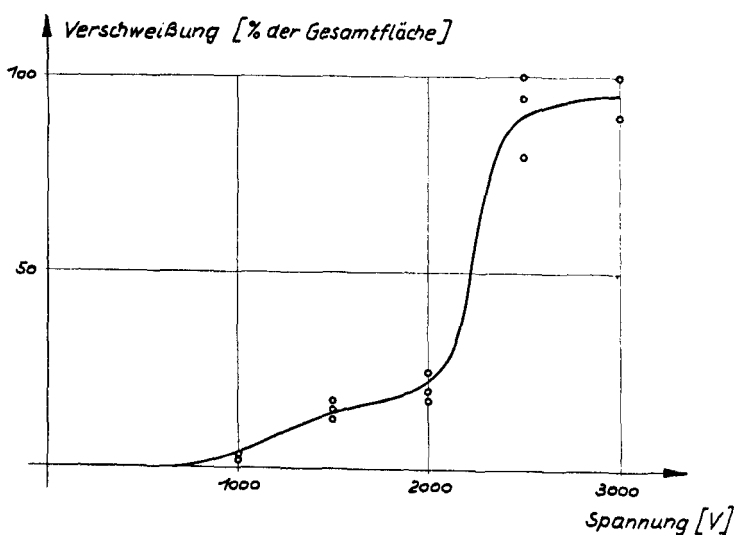


Abb. 6. Abhängigkeit der Fläche der Verschweißung von der Spannung.

Abhängigkeit von der Spannung. Die Versuche zeigten, daß die Schweißungen mit steigender Spannung besser werden und in dem erfaßten Bereich bei 3000 V am meisten befriedigen. Eine weitere Steigerung der Spannung würde vermutlich wegen Überschreitung der optimalen Energie eine Verschlechterung der Schweißergebnisse bringen. Dies war bei anderen Versuchen zu erkennen. Der Verlauf der Kurve (Abb. 6) erinnert im Bereich von 500 V bis 2500 V an eine Parabel. Dies ist etwa so zu deuten: Die Verschweißungen sind in starkem Maße von der Energie abhängig, die während der Dauer des

Lichtbogens frei wird. Diese ist um so größer, je höher bei vorgegebener Kapazität die Spannung. Die Spannung hat aber noch eine andere Bedeutung. Je höher sie ist, desto früher setzt auch die Entladung ein und desto länger wird die Zeitdauer des Lichtbogens. Bei sonst gleichen Versuchsbedingungen wird daher die für die Verschweißung nutzbare Energie stärker als linear anwachsen.

Abhängigkeit von der Kapazität. Die Untersuchungen ergaben eine Vergrößerung der verschweißten Fläche mit wachsender Kapazität, und zwar bei den vorliegenden Bedingungen etwa proportional der Kapazität.

Abhängigkeit von der Induktivität. Die Bedingungen wurden so gewählt, daß die für die Verschweißung verfügbare Energie zu groß war. In diesem Falle wurde die verschweißte Fläche mit wachsender Induktivität größer; das ist verständlich, denn mit wachsendem induktivem Widerstand ist die pro Zeiteinheit im Lichtbogen frei werdende Energie kleiner.

Neben dem Einfluß auf die Energie für den Schweißvorgang liegt die Bedeutung der Induktion darin, die Frequenz des Entladungsvorganges so gestalten zu können, daß während der Dauer des Lichtbogens mindestens einmal ein Polwechsel eintritt. Dies ist für die vollständige Verschweißung namentlich größerer Flächen nicht unwesentlich. Im aperiodischen Fall der Entladung können die Aufschmelzungen auf den zu verschweißenden Flächen erhebliche Unterschiede aufweisen. Es zeigt sich, daß die positive Seite namentlich bei zu kleinen Energien in geringerem Umfang als die negative Seite angeschmolzen wird. Wenn sich auch bei entsprechenden Versuchsbedingungen eine vollständige Verschweißung im aperiodischen Fall erzielen läßt, so ist doch die periodische Entladung mit mindestens einem Polwechsel während der Zeitdauer des Lichtbogens, vor allem bei größeren Flächen, vorzuziehen.

Abhängigkeit der Verschweißung von Druck und Impuls. Es zeigt sich, daß der Einfluß der Federkraft, zumindest im vorliegenden Fall, gering sein muß. Erst bei höheren Werten von 5 bis 10 kp/mm² und bei leicht verformbaren Metallen dürfte der Druck möglicherweise von Bedeutung sein. Wesentlicher für die Verschweißung ist indessen der Impuls. Seine Wirkung, d. h. die Wirkung des Stoßes beim Aufprall, kann man sich etwa folgendermaßen vorstellen. Infolge der großen räumlichen und zeitlichen Energiedichte im Lichtbogen kommt es auf den zu verschweißenden Flächen zu einer Reliefbildung. Hierdurch wird die völlige Berührung und Verschweißung behindert. Erst der hammerschlagartige Stoß schafft die gleichmäßige Berührung, und zwar in viel stärkerem Maße als die statische Federkraft allein. Die Ergebnisse zeigen in der Tat, daß mit wachsendem Impuls und damit stärkerer Energie des Stoßes die Schweißergebnisse besser werden. Allgemein läßt sich vielleicht sagen, daß ein starker Stoß, namentlich bei gut verformbaren Metallen, die Verschweißung sehr begünstigt, und eine Mindestgröße des Impulses sogar notwendig sein dürfte.

Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Je größer die Geschwindigkeit des bewegten Teils, desto kürzere Zeit besteht der Lichtbogen und desto weniger Energie ist für die Verschweißung nutzbar. Die Wahl der Geschwindigkeit ist also von großem Einfluß auf den Schweißvorgang.

Durchführung und Ergebnisse der Schweißversuche

Wolfram und Konstantan. Die Versuche hatten zunächst das Ziel, die Verschweißung von Wolframkontaktplättchen mit Kupfer und Kupferlegierungen zu erreichen. Wegen der großen Halterungsschwierigkeiten wurden die ersten Versuche mit größeren Wolframzylindern, 4 mm Durchmesser, 5 mm Länge, durchgeführt. Bei folgenden Versuchsbedingungen konnte vollständige Verschweißung erreicht werden:

Kapazität $C = 500 \mu\text{F}$; Spannung $V = 3000 \text{ V}$; Induktivität $L = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ H}$, Widerstand $R = 0,15 \Omega$; Federkonstante $c_2 = 172 \text{ pd/mm}$; Ausgangslage der Feder $x_a = 28 \text{ mm}$; Abstand $l = 10 \text{ mm}$; Masse $M = 96 \text{ g}$; Wolfram auf der positiven Seite.

Die metallographischen Schliffe zeigten einen guten Verbund. Eine Zwischenschicht in der Naht war nicht zu erkennen, obwohl eine Legierungsbildung möglich erscheint, nachdem Wolfram mit Nickel die Verbindungen Ni_6W und Mischkristalle bildet. Hingegen besteht zwischen Kupfer und Wolfram, sowie Mangan und Wolfram nach den betreffenden Zweistoffschaubildern keine Legierungsbildung. Über die Dreistoffsysteme ist nichts bekannt. Aus Widerstandsmessungen und Zerreißversuchen folgte ebenfalls der Eintritt eines guten Verbundes. Der Bruch erfolgte in allen Fällen nicht in der Schweißnaht, sondern im Wolfram.

Wolframkontaktplättchen und Neusilber. Für die Versuche wurden Wolframkontaktplättchen von 1,5 mm Durchmesser und 0,3 mm Höhe und Neusilber von 2 mm Durchmesser und 5 bis 16 mm Länge verwendet. Die Schwierigkeit lag neben der Verschweißung vor allem in der Halterung der kleinen Teilchen. Sie sollte möglichst einfach sein, ferner mußte die Kontaktfläche des Plättchens unbeschädigt bleiben. Die besten Ergebnisse erhielt man auf folgende Weise: Auf der positiven Seite der aufrechtstehenden Maschine wurde ein Wolframzylinder mit 4 mm Durchmesser und 5 mm Länge eingespannt und auf seine polierte Fläche das Plättchen gelegt. In die Mitte des Plättchens brachte man einen 8 bis 10 mm langen lackierten Kupferdraht von 0,08 mm Durchmesser, der zu einem kugeligen Knäuel geformt war. Die übrigen Versuchsbedingungen lauteten: Spannung 500 bis 600 V; Kapazität 500 μF ; Anfangsauslenkung der Feder $x_a = 28 \text{ mm}$; Abstand $l = 10 \text{ mm}$; Masse $M = 96 \text{ g}$.

Ohne das Kupferknäuel wies die Kontaktfläche nach der Verschweißung starke Beschädigungen auf. Wir erklärten die Wirkung der genannten Maßnahme dadurch, daß bei Spannungen von 500 bis 600 V und Geschwindigkeiten des beweglichen Teils von unter 1 m/sec die Entladung im wesentlichen erst stattfindet, wenn bereits zwischen Plättchen, Lackdraht und Neusilber eine enge Berührung eingetreten ist. Dadurch wird der Druck des beweglichen Neusilberteils über den Kupferdraht auf das Wolframplättchen übertragen, so daß zwischen diesem und seiner Unterlage ein guter Kontakt besteht. Er wird weiter durch den Druck des explosionsartig verdampfenden Drahtes aufrechterhalten. Die Beschädigung der Kontaktfläche war so gering und erst mit der Lupe zu erkennen. Eine Rißbildung im Plättchen konnte nicht beobachtet werden.

Die Schliffuntersuchungen ergaben einen guten Verbund. Eine Zwischenschicht konnte man auch hier nicht feststellen, obwohl eine Legierungsbildung wegen des Nickels möglich erscheint.

Ergebnisse der Zerreißversuche und Widerstandsuntersuchung

Zugfestigkeit [kg/mm ²]	Elektrischer Widerstand [Ω]
17,5	$2 \cdot 10^{-5}$
16	$3 \cdot 10^{-5}$
31	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Genauer läßt sich der Widerstand wegen der hohen Fehlergrenze nicht angeben.

Wolfram-Kupfer. Von Interesse waren Wolfram-Kupfer-Kontakte, ähnlich wie die von der Firma Dr. Dürrwächter hergestellten. Die Wolframplättchen hatten einen Durchmesser von 2 mm und eine Höhe von 0,4 mm. Wie schon bei der Verschweißung der Wolframplättchen mit Neusilber war hier unbedingt darauf zu achten, daß die Kontaktfläche unbeschädigt blieb, die Halterung einfach war und keine Rißbildung im Plättchen durch Stoßwirkung auftrat. Recht brauchbare Ergebnisse wurden auf folgende Weise erzielt. In der aufrechtstehenden Maschine legte man das Plättchen auf der positiven Seite auf eine Kupferunterlage. Der mit dem Plättchen zu verschweißende Kupfersockel, gehalten mittels einer Spannzange, wurde dagegengedrückt. Zwischen Plättchen und Sockel brachte man ein zu einem Knäuel geformtes Stück lackierten Kupferdrahtes von 6 bis 8 mm Länge und 0,08 mm Durchmesser. Lackierte Drähte waren deshalb vorteilhaft, weil hierdurch die Kontaktfläche zwischen Draht und Plättchen genügend klein blieb. Bei Entladung verdampfte bzw. verflüssigte sich das Knäuel. Hierdurch und durch den sich bildenden Lichtbogen wurden die zu verschweißenden Flächen aufgeschmolzen und verschweißt. Form und Lage des Kupferdrähtchens war wichtig, denn es zeigte sich, daß ihre Veränderung bei sonst gleichen Versuchsbedingungen eine gute Verschweißung, eine nur teilweise Aufschmelzung und sehr geringe Verschweißung der Fläche oder auch eine starke Beschädigung des Kupfersockels bewirkt. Unter den übrigen Versuchsbedingungen stellten sich folgende als besonders günstig heraus: Spannung 800 V; Kapazität 500 μ F; Induktivität $2,55 \cdot 10^{-5}$ H; Widerstand 0,47 Ω ; Federkonstante $c = 172$ pd/mm; Feder-spannung 2 bis 3 kp. Die Versuche waren in ihren Ergebnissen zuverlässig und leicht reproduzierbar. Die Kontaktfläche wies auch bei Betrachtung unter dem Binokular keine nennenswerte Beschädigung auf. Die Untersuchung der Schliffe zeigte einen guten Verbund und auch beim Ätzen keine Rißbildung am Wolfram (siehe auch Bild 7).

Wenn die Verschweißung von Wolfram-Kupfer-Kontaktlinien auch zu guten Ergebnissen geführt hat, so fehlt doch noch die praktische Erprobung dieser geschweißten Kontakte. Man kann daher nicht sagen, ob die Schweißung Vorteile gegenüber der hochentwickelten Löttechnik dieser Verbindungen aufweist.

Ergebnisse der Zerreißversuche und Widerstandsmessungen

Zugfestigkeit [kg/mm ²]	Elektrischer Widerstand [Ω]
18	$1,1 \cdot 10^{-5}$
16	$9 \cdot 10^{-6}$
14	$8 \cdot 10^{-6}$

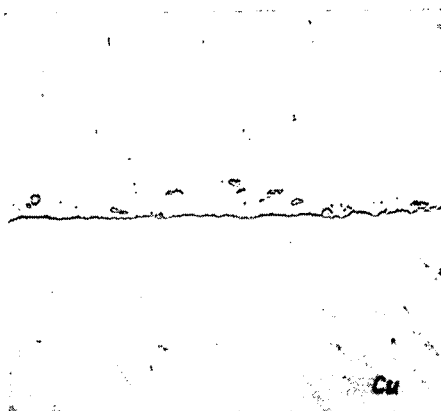


Abb. 7. Verschweißung von Wolfram und Kupfer, ungezt, 250:1

Verschweißung anderer Paare von ungleichen Metallen

Die erzielte Verschweißung von Wolfram mit Blei (Zylinder von 4 mm \varnothing) war so gut, daß bei Zerreißproben der Bruch im Blei und nicht in der Schweißnaht erfolgte. Entsprechend verhielten sich Verschweißungen von Eisen und Blei. Diese waren besonders aufschlußreich, da die beiden Metalle sich weder im festen noch im flüssigen Zustand legieren. Man muß sich daher vorstellen, daß die Haftung hier ohne dreidimensionale Legierungsbildung erfolgt und nur einen flächenhaften Vorgang darstellt*). Auch bei Wolfram und Aluminium war der Verbund recht gut, weniger gut indessen wegen der großen Sprödigkeit bei Wolfram und Wismut. Ferner gelang eine gute Verbindung von Aluminium mit Kupfer. Die Zwischenschicht bestand hier erwartungsgemäß im wesentlichen aus Al_2Cu und dem Eutektikum Aluminiummischkristall— Al_2Cu . Eine Verbindung war endlich möglich zwischen Prismen aus Hartmetall (Höhe 5 mm) und Abschnitten aus Stahldraht mit 4 mm Durchmesser und 10 bis 16 mm Länge. Als zweckmäßige Hilfsmaßnahme erwies sich die Anwendung einer Schicht flachgedrückten Eisen- oder Kupferpulvers auf der zu verschweißenden Hartmetallflche. Diese Schicht wurde bei der Entladung verflüssigt. Die übrigen Versuchsbedingungen waren: Spannung 3000 V; Kapazität 500 μF ; Widerstand 0,15 Ω ; Induktivität $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ H}$; Federkonstante $c_3 = 850 \text{ pd/mm}$; Anfangsauslenkung der Feder $x_a = 20 \text{ mm}$; Abstand $l = 10 \text{ mm}$; Masse $M = 96 \text{ g}$.

*) W. Hofmann u. J. Ruge, Z. Metallkde. 43 (1952), S. 133.

Zusammenfassung

Die zu verschweißenden Flächen wurden mit einer Kondensatorbatterie verbunden, deren Spannung 500 bis 3000 V bei einer Kapazität von 40 bis 500 μF betrug. Die Verschweißung erfolgte beim Zusammenschlagen der beiden Teile auf Grund der hohen zeitlichen und räumlichen Energiedichte der Entladung. Folgende Metalle konnten geschweißt werden: Wolfram mit Konstantan, Wolfram mit Neusilber, Wolfram mit Kupfer, Wolfram mit Blei, Wolfram mit Aluminium, Wolfram mit Wismut, Aluminium mit Kupfer, Hartmetall mit Stahl, Blei mit Stahl. Die Güte der Verschweißung konnte durch Zerreißversuche, Widerstandsmessungen und metallographisch geprüft werden.

Vorliegende Arbeit entstand aus Diskussionen mit Herrn Prof. Dr. E. Justi, der für ihre Durchführung auch Mittel des Instituts für Technische Physik zur Verfügung stellte. Außer Herrn Prof. Dr. E. Justi sind wir den Firmen Dr. Dürrwächter, Pforzheim; Wallram, Essen; Widia-Fabrik, Essen für die Überlassung von Versuchsmaterial zu Dank verpflichtet.